

## ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРА С РАВНОВЕСИЕМ Э. Д. С. ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Л. В. БАГИНСКИЙ

(Представлено проф. докт. техн. наук И. Д. Кутявиным)

Производственные испытания проводились с целью проверки основных выводов в отношении свойств дифференциальной защиты генератора с равновесием э.д.с. холостого хода трансформаторов тока, изложенных в [1] и [2]. Из [1] известно, что трансформаторы тока в названной схеме работают в режиме холостого хода. В [2] показано, что такой режим работы допустим, если сечение стали спирального сердечника не превосходит  $q \leq 17 \text{ см}^2$ , а число витков вторичной обмотки  $w_2$  и значение  $q$  выбраны из условия ограничения максимально возможной величины амплитуды вторичной э.д.с.  $E_{2\lambda} \leq 1000 \text{ в}$ . Возможность такого ограничения заключается в том, что при синусоидальном первичном токе  $I_1$  зависимость  $E_{2\lambda} = f(I_1)$  нелинейна, причем  $E_{2\lambda}$  нарастает медленнее, чем  $I_1$ .

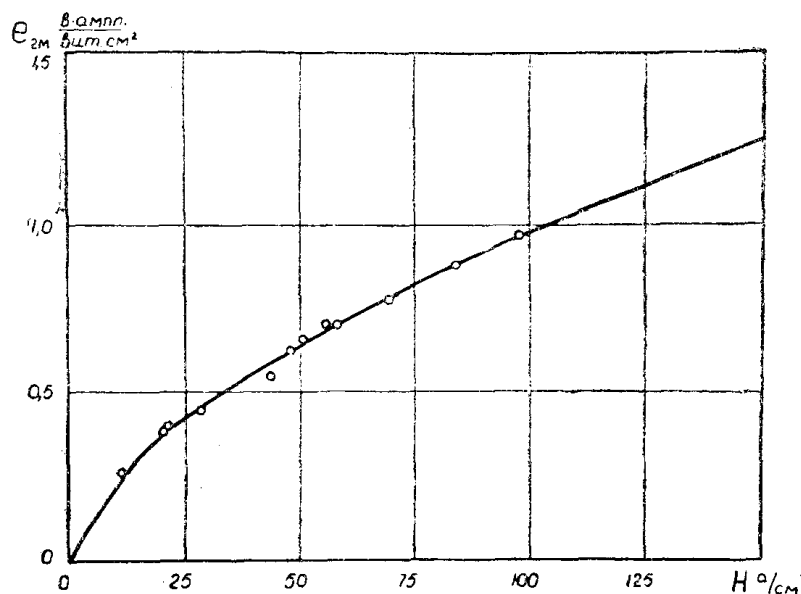
Первый этап производственных испытаний состоял в проверке этих положений в условиях эксплуатации. Для этого был изготовлен опытный образец посредством переделки трансформаторов тока типа ТПШФ 10—4000—3. На внутренней поверхности тора сердечника был укреплен горячий спай тщательно отградуированной термопары „капель-хромель“. Сердечник был изолирован тремя слоями микаленты и двумя — асболенты. Вторичная обмотка выполнена проводом ПСД и пропитке не подвергалась. Изготовленный таким образом трансформатор тока имел следующие параметры: длина средней магнитной линии сердечника  $l_{cp} = 104 \text{ см}$ ,  $q = 5,9 \text{ см}^2$ ,  $w_2 = 10$  витков. В условиях испытаний предусмотрены ряд мероприятий, обеспечивающих достаточный запас надежности в результатах опыта, а именно:

1. Сечение сердечника завышено в 2—3 раза против потребностей исследуемой схемы защиты.
2. Измерялась температура наиболее нагретого участка поверхности сердечника, а не температура вторичной обмотки.
3. Сердечник изолирован непропитанной асболентой, которая существенно ухудшала условия его охлаждения.

Испытания на тепловую устойчивость производились длительным пропусканием рабочего тока трансформатора 1000 кВа  $I_1 = 750 \text{ а}$  через первичную обмотку испытуемого трансформатора тока, что соответствует напряженности поля в сердечнике  $H = 10,2 \text{ а/см}$ . При

этом температура перегрева стали оказалась  $\tau_c = 8^\circ\text{C}$ . Затем опыт был повторен на генераторе 50 мвт при  $I_1 = 3200 \text{ а}$  ( $H = 43,5 \text{ а/см}$ ), причем температура перегрева получилась  $\tau_c = 39^\circ\text{C}$ . На основании этих замеров можно заключить, что зависимость приблизительно линейна. Поэтому ориентировочно можно оценить величину  $\tau_c$  и при других значениях  $I_1$ . Например, при номинальном первичном токе трансформатора тока  $I_{1H} = 5000 \text{ а}$ ,  $H = 68 \text{ а/см}$  и, следовательно, можно ожидать  $\tau_c = 61^\circ\text{C}$ . Считая, что температура окружающей среды не должна превосходить  $\theta_0 = 35^\circ\text{C}$ , получим наибольшую возможную температуру сердечника  $\theta_c = 96^\circ\text{C}$ . Поэтому для изготовления трансформаторов тока при  $I_{1H} \leq 5000 \text{ а}$  можно применять провод ПБД с пропиткой, изолируя сердечник электрокартоном. При  $I_{1H} = 6000 \text{ а}$  температура стали повысится незначительно, так как существенно возрастет величина  $I_{cp}$  и значение напряженности поля в сердечнике повысится мало.

Таким образом, для обеспечения тепловой устойчивости при разогреве сердечника в режиме холостого хода следует выполнять вторичную обмотку проводом ПБД с пропиткой, если  $I_{1H} \leq 5000 \text{ а}$ , и проводом ПСД, если  $I_{1H} = 6000 \text{ а}$ . С точки зрения тепловой устойчивости нет препятствий к помещению трансформаторов тока дифференциальной защиты с равновесием э.д.с. холостого хода в одном кожухе с трансформаторами другого назначения.



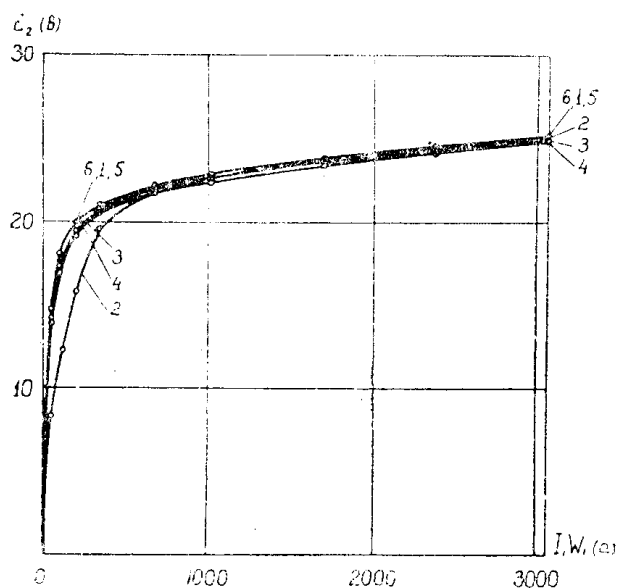
Фиг.1

Описанный образец трансформатора тока использовался также для снятия зависимости удельной амплитуды вторичной э.д.с. от напряженности синусоидального магнитного поля в сердечнике  $l_{2m} = f(H)$ . Для этого испытуемый образец монтировался на трансформаторе 1000 ква, генераторах 25 и 50 мвт, включенных на короткую. Результаты этого опыта приведены на фиг. 1. Они свидетельствуют о нелинейности зависимости  $l_{2m} = f(H)$ , повторяя характер кривой рис. 3 в [2].

Для проверки основных свойств дифференциальной защиты с равновесием э.д.с. холостого хода трансформаторов тока, описанных в [1], а также для количественной оценки этих свойств был изготовлен трехфазный комплект этой защиты. Параметры трансформаторов

этого комплекта были следующие:  $q=2,34 \text{ см}^2$ ,  $l_{cp}=77 \text{ см}$ ,  $w_2=340$  витков. Сердечники не подвергались отжигу и были изолированы электрокартоном. Вторичная обмотка была выполнена проводом ПСД без пропитки, так как в отведенный для подготовки к испытаниям промежуток времени невозможно было выполнить обмотку проводом ПБД с пропиткой в условиях мастерской кафедры электрические станции, сети и системы Томского политехнического института. На фиг. 2 приведены характеристики холостого хода трансформаторов тока испытываемой схемы  $E_2=f(I_1 w_1)$ . Наибольшее различие наблюдается между характеристиками трансформаторов №№ 1, 5, 6, с одной стороны, и трансформатора № 2, с другой. Это различие имеет место в области средних индукций и достигает 41,5%, что объясняется, вероятно, существенными деформациями лент сердечника трансформатора № 2, которые они испытывали при перемотке сердечника.

Схема дифференциальной защиты с равновесием э. д. с. холостого хода трансформаторов тока была смонтирована на генераторе 25 мвт 10,5 кв. Трансформаторы тока были распределены по фазам таким образом, чтобы получить наибольшие токи небаланса при испытаниях. Для этого трансформаторы №№ 1, 5 и 6 были размещены на нулевых выводах обмоток фаз К, З и Ж соответственно, а трансформаторы №№ 2, 3 и 4 соответственно на те же фазы, но со стороны линейных выводов. Таким образом, наибольшее расхождение характеристик было у трансформаторов тока фазы К (41,5%).



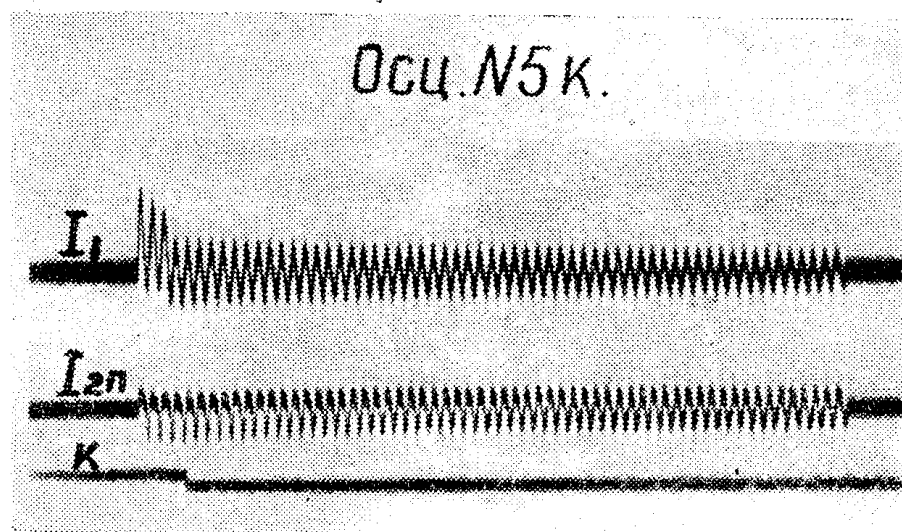
Фиг. 2.

Схема соединения вторичных и оперативных цепей при испытаниях показана на фиг. 3. В качестве токовых реле  $T$  использованы реле типа ЭТ—521/0,6, промежуточных реле П—ЭП—101 и добавочных индуктивных сопротивлений  $D$ —дрессели с малым воздушным зазором. Последние использовались не во всех опытах. С помощью осциллографа записывались токи вторичной и первичной цепей (шлейф  $I_1$  питался от измерительных трансформаторов тока  $TT_u$  класса 0,5) и линии контактов реле П.

В наиболее тяжелых условиях находилась фаза К схемы из-за несоответствия характеристик трансформаторов тока. Поэтому результаты, полученные в ходе испытаний этой фазы схемы, являются наиболее характерными. В дальнейшем будем рассматривать в основном эти результаты.

Как известно, внезапное короткое замыкание в зоне дифференциальной защиты с равновесием э. д. с. холостого хода, установленной на изолированно работающих генераторах с большой постоянной времени цепи статора, может отключаться с задержкой. Задержка может быть преодолена посредством увеличения постоянной времени вторичной цепи  $T_2$  [1] или увеличением коэффициента чувствительности

Фаза  $K$  схемы настраивалась на величину постоянной времени  $T_2 = 0,01$  сек. При активном сопротивлении цепи  $r_2 = 2,42$  ом для этого потребовалось иметь величину индуктивного сопротивления цепи реле  $\omega L_2 = 6,2$  ом. На основании лабораторных испытаний схемы с трансформаторами тока №№ 1 и 2 при данных величинах  $r_2$  и  $\omega L_2$  была принята уставка реле  $I_y = 0,5$  а при коэффициенте надежности  $\kappa_n = 2$  (фиг. 6). Такая уставка обеспечивала величину  $\kappa_1 \cong 4,4$  для условий данного опыта, когда наибольшее значение первичного тока было  $I_1 = 9$  ка (фиг. 5).



Испытания показали, что ни в одном из случаев задержек в срабатывании реле фазы  $k$  схемы не было. Типичная осциллограмма про-

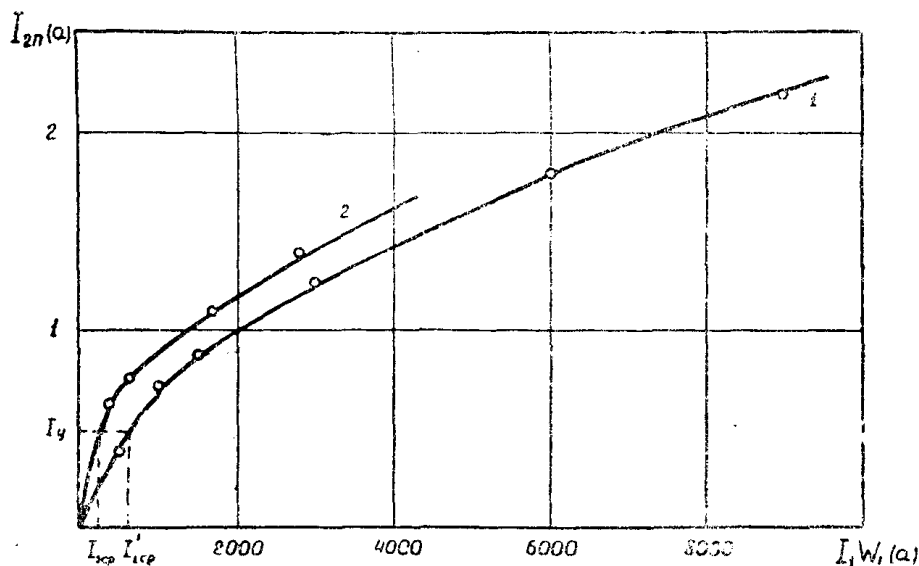
цесса в цепях фазы  $K$  защиты при внезапном коротком замыкании в зоне приведена на фиг. 4. Ввиду ограниченности разрешенного числа включений на закоротку не удалось испытать фазу  $K$  схемы при других значениях  $T_2$  и  $\kappa_4$ . Отметим лишь, что приблизительно при таком же значении  $T_2$  фазы 3 схемы ( $T_2 = 0,012$  сек), но при  $\kappa_4 \approx 2,5$  имели место задержки в срабатывании защиты. Таким образом, повышение величины  $\kappa_4$  является эффективным способом устранения задержек в срабатывании защиты при изолированной работе генератора. Поскольку индуктивные добавочные сопротивления в цепи реле не повышают значений  $\kappa_4$ , целесообразно отказаться от них, если селективность работы защиты при этом будет обеспечена.

Для выявления возможности возникновения задержек в срабатывании при работе защищаемого генератора в системе на фазе  $Ж$  схемы вместо дросселя была установлена закоротка, соединяющая фазный провод схемы с нулевым. Этим имитировался режим внутреннего повреждения с равными токами, притекающими в точку повреждения со стороны системы и генератора. Отметим, что значения  $T_2$  и  $r_2$  в данном опыте были существенно заниженными по сравнению с имитируемым режимом. В самом деле, при коротком замыкании в зоне защиты с двухсторонним питанием на каждый трансформатор тока приходится нагрузка, состоящая из половины суммы сопротивлений реле  $z_p$  и соединительного фазного провода  $z_{np}$ , что для испытываемой схемы составит  $1,5$  ом. В данном опыте нагрузка была равна  $0,5(z_{np} + z_{опр} + 2z_p)$ , где  $z_{опр}$  — сопротивление нулевого провода, что обусловило результирующее сопротивление порядка  $3,2$  ом. Уставка реле фазы  $Ж$  схемы была выбрана  $I_y = 0,3$  а при  $\kappa_n > 2$ . Однако даже и при этих условиях не было отмечено ни одного случая задержки в срабатывании. Этот же опыт свидетельствует о достаточной тепловой устойчивости катушек реле ЭТ-521/0,6 (односекундный ток  $I_{1с} = 45$  а при последовательном соединении катушек) в режиме короткого замыкания в зоне защиты с двухсторонним питанием, так как значения тока в реле не превысили  $8$  а.

Для определения первичного тока срабатывания  $I_{1ср}$ , а также тока в реле при повреждении в зоне защиты  $I_{2п}$  была снята зависимость  $I_{2п} = f(I_1 w_1)$  при указанных выше параметрах цепи реле фазы  $K$  и одностороннем питании точки короткого замыкания в зоне защиты. Результаты этого опыта показаны на фиг. 5 кривой 2. Там же кривая 1 показывает результат испытания пары трансформаторов тока №№ 1—5 в лабораторных условиях при тех же значениях  $r_2$  и  $\omega L_2$ , что и для кривой 2. Несовпадение кривых 1 и 2 объясняется тем, что при снятии кривой 1 трансформатор тока, первичная обмотка которого обтекалась током  $I_1$ , больше загружался индуктивным сопротивлением второго трансформатора, чем при снятии кривой 2, (фиг. 2). Поскольку различие в характеристиках трансформаторов тока №№ 1 и 2 наиболее значительно в области малых и средних индукций, следует ожидать, что при весьма больших  $I_1$  кривые 1 и 2 должны совпасть. Проверить это положение не удалось, поскольку нельзя было получить установившийся ток короткого замыкания более  $2800$  а.

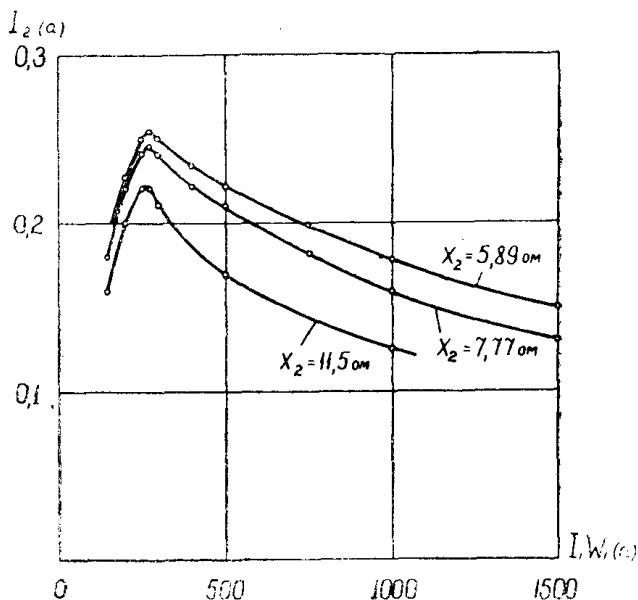
Как видно из фиг. 5, расположение трансформаторов тока с более высокой характеристикой со стороны нулевых выводов дает значительные преимущества в величине  $I_{1ср}$  по сравнению расположением их со стороны линейных выводов. Например, при  $I_y = 0,5$  а в случае расположения трансформатора тока № 1 со стороны нулевых выводов  $I_{1ср} = 220$  а или  $I_{1ср} = 0,13 I_{нг}$ , а при совпадающих характеристиках —  $I_{1ср} = 600$  а или  $I_{1ср} = 0,35 I_{нг}$ . При расположении трансформатора тока № 1 со стороны линейных выводов можно ожидать  $I_{1ср} \geq 0,7 I_{нг}$ .

Такое расположение трансформаторов тока может быть выполнено без дополнительных затрат времени, так как и в настоящее время вольтамперные характеристики трансформаторов тока дифференциальной защиты снимаются эксплуатационным персоналом.



Фиг. 5.

Таким образом, в данном опыте при индуктивном добавочном сопротивлении в цепи реле  $5,2 \text{ ом}$  и  $\kappa_H = 2$  фаза  $K$  защиты обладает первичным током срабатывания  $I_{1cp} = 0,13 I_{H2}$  и коэффициентом чувствительности  $\kappa_4 \cong 4,4$ . В действительности ток двухполюсного короткого замыкания на выводах защищаемого генератора будет не 9, а  $12 \text{ кА}$  и поэтому  $\kappa_4 \cong 6$ .



Фиг. 6.

Наибольшая величина тока небаланса в стационарном режиме определялась посредством снятия характеристик  $I_2 = f(I_1 W_1)$ , причем  $I_2$  замерялась с помощью реле ЭТ-521/0,6. Эти зависимости снимались сначала в лаборатории при подготовке к испытаниям, а затем—в процессе испытаний, и в обоих случаях получены одинаковые результаты. Как и следовало ожидать, наибольший ток небаланса был зарегистрирован в фазе  $K$  схемы (фиг. 6). Его максимум располагается при  $I_1 \cong 330 \text{ А}$  и достигает величины

Проверка селективности испытуемой защиты производилась путем измерения токов небаланса  $I_2$  в стационарном режиме и осциллографированием токов в цепях защиты и линии контактов реле  $\Pi$  (фиг. 2) при внешних внезапных коротких замыканиях.

Наибольшая величина тока небаланса в стационарном режиме определялась посредством снятия характеристик  $I_2 = f(I_1 W_1)$ , причем  $I_2$  замерялась с помощью реле ЭТ-521/0,6. Эти зависимости снимались сначала в лаборатории при подготовке к испытаниям, а затем—в процессе испытаний, и в обоих случаях получены одинаковые результаты. Как и следовало ожидать, наибольший ток небаланса был зарегистрирован в фазе  $K$  схемы (фиг. 6). Его максимум располагается при  $I_1 \cong 330 \text{ А}$  и достигает величины

0,25 а при  $\omega L_2 = 5,89$  ом. Из фиг. 6 следует, что увеличение  $\omega L_2$  незначительно снижает максимальное значение  $I_2$ , но зато сильно снижает  $I_2$  при больших значениях  $I_1$ . Это объясняется преобладанием первой гармоники в токе  $I_2$  при малых величинах  $I_1$ , вызванным значительным расхождением характеристик трансформаторов тока. При увеличении  $I_1$  содержание высших гармонических в токе  $I_2$  резко возрастает за счет насыщения стали сердечников трансформаторов, вследствие чего  $I_2$  существенно ограничивается  $\omega L_2$ . Поэтому нецелесообразно стремиться ограничивать ток  $I_2$  добавочными индуктивными сопротивлениями, если максимум его располагается в области малых токов. Эти соображения позволили исключить из цепи реле фазы  $K$  дроссель перед опытом внешнего короткого замыкания. Катушки реле были соединены последовательно и вновь замерен ток  $I_2$ . Он имел следующие значения: при  $I_1 = 2800$  а  $I_2 = 0,15$  а и при  $I_1 = 350$  а  $I_2 = 0,3$  а.

В двух других фазах схемы измерить токи  $I_2$  во время производственных испытаний не удалось, так как при последовательном соединении катушек реле они не срабатывали при  $I_y = 0,15$  а. Это свидетельствует о весьма больших значениях коэффициентов надежности в этих фазах схемы.

Внезапные короткие замыкания вне зоны защиты были включены в программу испытаний с целью проверки селективности защиты, а также для того, чтобы показать, что наибольшие токи небаланса вызывают периодический первичный ток. Чтобы поставить защиту в наиболее тяжелые условия, катушки реле были соединены параллельно для уменьшения их сопротивления, а на реле фаз  $З$  и  $Ж$  заданы минимальные уставки  $I_y = 0,3$  а. На реле фазы  $K$  уставка не могла быть принята минимальной, так как при параллельном соединении катушек и  $I_1 = 350$  а  $I_2 \cong 0,45$  а, то есть при применении реле ЭТ-521/0,6 не могло быть выдержано значение  $\kappa_n = 2$ . Однако реле ЭТ-521/0,6 не было заменено на реле ЭТ-521/2 из следующих соображений. Значение наибольшего тока небаланса фазы  $K$  имеет место при малых  $I_1$  и поэтому зависит только от соотношения характеристик трансформаторов тока в области малых и средних индукций и не зависит от  $I_1$  и  $T_1$ . Поскольку характеристики трансформаторов тока весьма устойчивы, возможно в данном случае существенно снизить величины  $\kappa_n$  вплоть до значений, принимаемых в максимальной защите. В данном опыте движок реле был выведен вправо до предела, что обеспечило  $I_y \cong 0,65$  а.

При такой настройке схемы защищаемый генератор был 6 раз включен на короткую, установленную вне зоны защиты, при  $U_2 = 6,3$  кВ. Ни одного случая срабатывания защиты в этом опыте не отмечено. Анализ осциллограмм показывает, что аperiodическая составляющая в токе  $I_2$  не появляется, а при наличии аperiodической слагающей в первичном токе ток  $I_2$  резко уменьшается. Эти наблюдения полностью согласуются с выводами, сделанными в [1], и позволяют измерять наибольшее значение тока небаланса без проведения специальных испытаний при нормальной работе генератора.

Так как введение добавочных сопротивлений в цепь реле нежелательно по соображениям надежности работы схемы и отрицательного влияния их на величину  $\kappa_1$ , следует использовать для ограничения высших гармонических тока небаланса сопротивление катушек реле. Для этого необходимо применять в схеме реле с преимущественно индуктивным сопротивлением катушек (ЭТ-521/0,6 или ЭТ-521/2 с последовательным соединением катушек). Это же реле может использоваться для замера тока небаланса в случае, когда характери-

стики трансформаторов значительно расходятся. Для того, чтобы выдержать значения  $\kappa_H = (1,5-2)$ , может возникнуть необходимость смещать движок реле за пределы шкалы уставок вправо. В связи с этим желательно при настройке реле в заводских условиях располагать поводок возвратной пружины таким образом, чтобы он позволял смещать движок реле как можно дальше вправо. Тогда выбор уставок можно производить следующим образом. В случае хорошего совпадения характеристик трансформаторов тока ток  $I_2$  не удастся измерить при помощи реле. Тогда следует принять максимальную уставку при последовательном соединении катушек реле, что обеспечивает значение  $\kappa_H > 2$ . Если ток  $I_2$  удастся измерить с помощью реле, но он не нарастает с уменьшением  $I_1$ , то уставку необходимо определять как  $I_y = (2-3) I_{2H}$ , где ток  $I_{2H}$  — ток  $I_2$ , измененный при  $I_1 = I_{H2}$ . При мощности защищаемого генератора 25 мвт или более следует полагать  $\kappa_H = 2$ . Если максимальное значение тока  $I_2$  имеет место при малых  $I_1$ , следует принять  $\kappa_H = (1,3-1,5)$ .

После окончания испытаний защиты она была оставлена в опытной эксплуатации на том же генераторе с действием на сигнал. В продолжении опытной эксплуатации было зарегистрировано 6 внешних коротких замыканий, на которые защита не реагировала.

Как следует из [1], высокие значения амплитуды вторичной э. д. с. трансформаторов тока, определяемые свойствами стали сердечников, и стремление ограничить величину  $E_{2м}$  до слишком малой величины могут составить препятствие к получению необходимой чувствительности дифференциальной защиты с равновесием э. д. с. холостого хода при большой мощности защищаемого генератора. В процессе эксплуатации защиты были измерены величины  $E_{2м}$  при полной нагрузке генератора. Трансформаторы тока, установленные на нулевых выводах, имели наибольшие значения  $E_{2м} = 520$  в ампл. Наименьшую величину  $E_{2м}$  имел трансформатор тока № 2  $E_{2м} = 300$  в ампл., что объясняется пологим ходом его характеристики в области малых индукций. Наличие значительного тока небаланса в фазе К схемы понизило напряжение между фазным и нулевым проводами схемы до 375 в ампл. при 520 в ампл. в двух других фазах.

Следовательно, для снижения  $E_{2м}$  необходимо иметь пологие характеристики трансформаторов тока в области малых индукций. Это может быть достигнуто с одновременным упрощением технологии изготовления трансформаторов тока, если отказаться от отжига сердечников после их изготовления. Отказ от отжига не может понизить значения  $K_1$ , так как трансформаторы работают при весьма высоких индукциях, а кривая намагничивания в области высоких индукций при отжиге не повышается [3]. С другой стороны, едва ли можно считать оправданным поставленное в [2] ограничение величины  $E_{2м} \leq 1000$  в ампл., так как наибольшие значения возникают временно (при внешних коротких) и не могут быть опасными для изоляции. В самом деле, вторичные цепи защиты обычно проверяют мегомметром на 2,5 кв. Поэтому целесообразно ограничивать лишь амплитуду напряжения при  $I_1 = I_{H2}$  величиной  $E_{2м} \leq 250 \cdot \sqrt{2} = 350$  в ампл. из соображений безопасности обслуживания схемы. В этом случае  $E_{2м}$  может достигать при сверхтоках величины 1500—1800 в ампл.

Защита находилась в непрерывной эксплуатации в продолжении года. Поскольку ни в цепях защиты, ни у трансформаторов тока за это время изоляция не ухудшилась, можно считать, что трансформаторы тока достаточно устойчивы в отношении нагрева потерями



в стали в режиме холостого хода, цепи защиты легко выдерживают повышенные напряжения.

### Выводы

1. Режим холостого хода трансформаторов тока в исследуемой схеме не является препятствием к применению ее на генераторах любой мощности.

2. Расход меди и стали на изготовление трансформаторов тока для такой схемы в 5—10 раз меньше, чем для трансформаторов класса „Д“. Сердечники трансформаторов не должны подвергаться отжигу.

3. Наибольшее значение имеет ток небаланса, вызванный периодическим первичным током.

4. Если сердечники трансформаторов тока дифференциальной защиты с равновесием э.д.с. холостого хода изготовлены из равного количества полос стали одной марки, она обладает следующими характеристиками:  $I_{\text{ср}} \leq 0,3 I_{\text{нз}}$ ,  $K_4 \geq 7$ .

5. При отсутствии добавочных сопротивлений в цепи реле исследуемая защита не будет обладать задержками в срабатывании в случае замыкания в зоне даже при изолированной работе защищаемого генератора, если  $k_1 \geq 5-6$ .

6. В исследуемой защите целесообразно применять реле с преимущественно индуктивным сопротивлением (ЭТ-521 0,6 или ЭТ-521/2 с последовательным соединением катушек).

В подготовке и проведении производственных испытаний активное участие приняли инженеры В. С. Ануфриев, М. Г. Барышников, Б. А. Борковский, Л. Р. Верещагин, Я. Б. Вишневский, Н. А. Дульзон, Ю. Я. Кириченко, В. С. Колесников, Ю. А. Смирнов, которым автор приносит глубокую благодарность.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Багинский Л. В. О применении трансформаторов тока с малым объемом стали для дифференциальной защиты генераторов, Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. С. М. Кирова, том 94, 1958.

2. Багинский Л. В. О длительной работе трансформаторов тока с разомкнутой вторичной обмоткой, Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. С. М. Кирова, том 94, 1958.

3. Займовский А. С. и Чудновская Л. А. Магнитные материалы, ГЭИ, 1957.